心理科学进展 2021, Vol. 29, No. 7, 1300–1312
Advances in Psychological Science
https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2021.01300

贝叶斯决策理论对复杂运动决策中运动预期的启发*
——以网球和足球为例

王泽军[1] 褚昕宇[2]

([1]同济大学国际足球学院, 上海 200092) ([2]上海工程技术大学体育经济管理研究中心, 上海 201620)

摘 要 对运动决策的研究是认知运动心理学的一个重要领域。运动预期被认为是运动决策的核心, 受到运动学和非运动学信息的影响。其中, 对运动预期研究的一个关键问题是探讨不同信息源对运动结果预期的贡献以及两者之间的相互作用。研究者运用贝叶斯决策理论解释运动预期中不同信息的整合过程, 分析运动员在复杂的竞赛情景中如何做出最佳决策, 尤其是对该理论在网球和足球领域的潜在应用进行分析。在不确定的情况下, 竞技体育中并非所有的选择、结果或概率都是已知的, 故有研究者认为概率论和经典的决策理论不能有效解决此类问题。然而新近提出的启发式近似, 为运动员在贝叶斯框架下如何快速做出选择提供了理论依据: 首先, 在复杂和有时间压力的竞赛情景中, 启发式近似假设运动员依据竞赛中不同信息源的不确定程度, 很可能选择在运动学信息和情境先验之间进行切换启发式, 提高运动预期的效率。其次, 判断效用通过卷积效应影响两种信息源的整合, 降低情境先验的影响程度。

关键词 运动预期, 情境先验, 判断效用, 启发式近似
分类号 B849

1 引言

在竞技体育中, 特别是在巨大的时间压力情况下, 运动员预测对手下一步行动的能力至关重要。例如, 在网球、乒乓球和羽毛球中的接发球, 棒球和板球中的打击, 以及足球、曲棍球和手球中的罚点球、推击球或打门的情况下, 预测能力或许能够帮助运动员克服极端的时空约束。那些做出成功预测的运动员通常被描述为能够更好地阅读比赛, 表现出卓越的比赛智慧(Williams & Jackson, 2019)。早期的研究主要集中在运动学信息对运动预期的影响上, 荟萃分析证明运动专家能够基于对手动作的运动学差异来预测对手的动作意图(Mann et al., 2007), 在比赛中利用这种预测优势对对手下一步行动做出更早、更准确的响应。研究者将高水平运动员所具备的这种能力解释为他们优越的知觉−认知技能或认知优势(Williams, 2009; 周成林, 刘微娜, 2010)。然而前人研究中对非运动学信息的关注较少。

考虑到运动员在规划和执行下一步行动时, 会同时使用和依赖运动学和非运动学信息, 运动预期研究中的一个关键问题应该是探讨不同信息源对运动结果预期的贡献以及两者之间的相互作用(Cañal-Bruland & Mann, 2015)。因此, 研究者运用贝叶斯决策理论解释运动预期中不同信息的整合过程, 分析运动员在复杂的竞赛情景中如何做出最佳决策(Gredin et al., 2018, 2019; Helm et al., 2020; Körding, 2007; Loffing & Cañal-Bruland, 2017)。然而运动决策的特点是可利用信息少、时间压力大以及结果的不确定性, 这就迫使运动员必须快速做出选择(程勇民, 2006)。在不确定性的情况下, 竞技体育中并非所有选择、结果或概率都是已知的, 所以有研究者认为概率论和经典的决策理论不能够有效解决此类问题(Raab &

收稿日期: 2020-06-30
* 国家社科基金一般项目(16BTY068); 国家社科基金青年项目(17CTY019); 上海市教育科学研究一般项目(C2021084); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120210233)资助。
通信作者: 褚昕宇, E-mail: anitacxy@126.com

Gigerenzer, 2015)。但是, Gardner (2019)新近提出的启发式近似(heuristic approximation), 为运动员在贝叶斯框架下如何快速做出选择提供了理论依据。

2　影响运动预期的不同信息源及其整合

从心理学的角度看, 决策是指对行动目标与手段的探索、判断、评价, 直至最后选择的全过程。而运动决策特指在复杂的竞赛情景中, 在争胜目标指导下, 预见运动结果并选择运动行为的认知过程(程勇民, 2006)。运动决策通常可以划分为直觉决策和认知决策。直觉决策是指在一些快速、时间与压力大和结果不确定性的复杂竞赛情景中, 个人做出的具有快速、直接、或然性特点的决策。相较于需要较少的决策信息量, 决策速度较快, 决策时间较短的直觉决策, 认知决策主要依靠逻辑思维, 在严密的逻辑体系和严格的逻辑规则下进行。当运动员面临较大的时间压力, 需要迅速做出选择时, 多采用直觉决策(王斌, 2004)。另外, 一个完整的运动决策过程包括两个心理过程, 即预期反应和动作选择反应。预期反应是在信息尚未全部呈现以前对可能发生事件的预先判断, 主要是一种间接性和概括性的思维过程。预期是建立在背景知识基础上的对可能发生事件的内隐期望, 是个人根据当前正在加工的信息来预测未来的事件。运动预期特指运动员对运动结果的预测。运动专家具有预测优势, 可以通过后天改造得以提高(程勇民, 2006)。影响运动预期的因素通常可以划分为(视觉)运动学信息和非运动学(情境)信息。

2.1　运动学信息对运动预期的影响

在运动学信息研究中, 研究者专注于关键线索的识别及其从表现中被提取出来的时间点。例如, 在信息提取策略方面, 研究者使用多种实验范式以确定专家与新手之间的预测差异, 包括视频定格技术、光点显示和注视追踪(Mann & Savelsbergh, 2015)。Jones 和 Miles (1978)在研究中首次使用基于视频的时间阻断技术。他们让被试观看对手在网球发球时的图像, 并让被试预测球的落点。这项开创性工作强调了从对手(也可能是队友)的动作中提取姿势线索或生物动作信息的重要性, 从而预测对手下一步动作。与此类似的是, 在空间遮蔽范式中, 在每张单独的图像上编辑不同来源的信息来创造不同的事件遮蔽条件。这种范式允许研究者通过确定相对于无遮蔽控制条件下判断准确率下降的程度来识别信息最为丰富的视觉线索。而数码视频和图像编辑软件的出现则使研究者能快速且精确地屏蔽或删除不同信息源(Jackson & Mogan, 2007; Loffing & Hagemann, 2014)。另外, 与那些主要依赖于局部信息的技术较差的新手不同, 运动专家使用全局信息提取策略(Huys et al., 2009)。有证据表明, 运动专家能够更好地提取广泛分布在全身的信息。对于投掷或击打动作, 这些信息是以从近端到远端的方式加工的, 这反映了动作片段的序列募集现象(Abernethy et al., 2008)。区别于新手, 运动专家似乎对接近末端执行器的信息源特别敏感, 比如网球中的手臂和球拍(Huys et al., 2009)。

运动员在比赛中识别模式的能力被认为是一项重要的预测能力。研究发现, 运动专家的模式回忆与识别能力更强, 这种对序列的早期模式识别能力有助于运动员预测运动结果(Loffing et al., 2015; North et al., 2017)。另一项重要的预测能力是在表现中分辨展开事件重要性的能力。有证据表明, 运动专家在预测下一步的结果方面更准确, 更善于识别与任务相关的选项, 而忽略无关的选项, 并能够更准确地对这些选项进行排序(Belling et al., 2015; Ward et al., 2013)。因而认为, 运动专家依据可能的事件场景分配概率等级, 最小化不确定性, 减少认知负荷。此外, 运动专家在搜索和提取信息时, 会以一种不同的、可能更有效的方式使用视觉系统。有效信息的提取要求运动员在观察对手执行动作时, 将他们的视觉注意力(通常是通过注视)转移到最相关的身体部位。对眼动追踪的荟萃分析发现, 当运动专家试图预测对手运动结果时, 他们倾向于使用次数更少、持续时间更长的注视(Mann et al., 2007)。这种由注视次数和持续时间决定的最优搜索行为被证明是特定于任务和环境的(Roca et al., 2013)。而且, 在不同的运动项目, 乃至同一运动项目的不同任务中, 运动学线索都可能有所不同。

2.2　非运动学信息对运动预期的影响

运动员可以通过以往的比赛或表现来了解对手(Loffing & Cañal-Bruland, 2017)。早在 40 年前, 研究者就发现预期行为至少在一定程度上是由与运动无关的情境概率信息决定的, 而不完全依赖

于能够从这些运动中提取的视觉信息(Cañal-Bruland & Mann, 2015)。Abernethy 等人(2001)通过研究发现，在对手没有任何动作信息的情况下，情境信息可以用于预测运动结果。因此，通过了解特定运动中事件概率与竞赛情景之间的联系，运动专家可以通过为最高概率事件提前做好行动准备来减少结果的不确定性。与特定的表现情境相关的先验信息和信念被称为情境先验，比如环境、历史信息。它可以通过任务经验(Loffing et al., 2015; Mann et al., 2014)或明确的任务指令(Seriès & Seitz, 2013)获得。而且，运动专家更善于发现统计规律。例如，网球选手在每次发球时，当球始终指向同一位置，他们的反应会逐渐变得更快、更准确(Farrow & Reid, 2012)。空手道选手每 4 次进攻就会重复一遍攻击序列(Milazzo et al., 2016)。

然而直到最近研究者才开始系统地分析情境信息对预期行为的影响。这些情境信息来源包括球场上对手的位置(Loffing & Hagemann, 2014; Loffing et al., 2016)、比分(Farrow & Reid, 2012; Gray, 2002; Murphy et al., 2016; Runswick, Roca, Williams, Bezodis, McRobert, & North, 2018)、对手的动作偏好(Gredin et al., 2018; Mann et al., 2014; Navia et al., 2013)、对手的特定动作或动作序列(Loffing et al., 2015; Milazzo et al., 2016; Murphy et al., 2018)以及比赛与场地环境(Runswick et al., 2019)等。另外，Runswick, Roca, Williams, Bezodis 和 North (2018)将情境信息进一步划分为环境特定的和非环境特定的情境信息。其中，环境特定的情境信息是指信息源对于每个事件而言都是变化和具体的，比如比赛中剩余的时间和分数线。相比之下，非环境特定的情境信息是指更稳定的信息来源，比如过去的球队表现或对手的运动能力(Cañal-Bruland et al., 2015; Loffing et al., 2015)。由于技术的进步使得复杂的表现分析成为可能，为运动员提供对手的先验信息已普遍成为赛前准备的重要环节(Memmert et al., 2017)。

2.3 预期心理过程中运动学信息与非运动学信息的整合

有证据表明，运动学信息和非运动学信息在预期心理过程中可能被赋予不同的权重，在对手展开动作的过程中引导预期进行动态更新(Loffing & Hagemann, 2014; Loffing et al., 2016)。随着动作展开，所有这些情境信息都可能被动态提取(McRobert et al., 2011)。运动专家在整个预测过程中更多地使用了情境信息，能够更好地只依赖于情境信息进行预测(Runswick, Roca, Williams, McRobert, & North, 2018)。他们的预期行为受到他们对相对成本和收益的评估响应与否的影响(Cañal-Bruland et al., 2015)。对简单启发式的研究也表明，运动专家倾向于在不确定的情况下使用各种信息源迅速做出判断。例如，在提取可靠的视觉信息之前就需要启动动作响应的情况(de Oliveira et al., 2014; Raab, 2012)。另外，视觉信息和情境信息对预期的相对贡献可能会随着任务约束(Roca et al., 2013)、成绩压力(Cocks et al., 2016)或比赛情况(Williams, 2009)等多个因素的变化而变化。

近期研究强调了情境先验在支持预期行为方面的重要作用。在运动决策中，信息源的整合应考虑来自这些信息源的不确定性及可靠性。当一个或多个信息源不太可靠时，最有效的策略是在信息整合过程中重视更可靠的信息源(Cañal-Bruland et al., 2015; Gray, 2002; Gray & Cañal-Bruland, 2018; Mann et al., 2014)。情境先验和运动学信息是两个截然不同的信息源，两者不仅在内容上有本质上的差别，而且有可能在不同的时间尺度上发挥作用。例如，情境信息通常是在运动学信息出现之前就已经收集完毕。情境信息在动作执行之前可用，而运动学信息只有在对手的动作展开时才可用。由于不同信息源在确定性方面可能存在差异，运动学信息比之前任何的情境信息更有可能与实际运动结果相关。考虑到许多运动项目的高度时间约束，以及运动员试图掩盖其动作意图的可能性，运动学信息本身可能不足以预测运动结果(Helm et al., 2020)。尤其是当与任务相关的时间需求增加时，情境信息可能变得越发重要，因此有必要整合不同信息源来做出判断。一种可行的解决方案是通过整合运动学信息和非运动学信息来优化预期反应，该方式与贝叶斯整合一致(Gredin et al., 2018, 2019; Helm et al., 2020; Körding, 2007; Loffing & Cañal-Bruland, 2017)。

3 贝叶斯决策理论

贝叶斯决策理论是用于理解人的神经系统如何在一个不确定的环境中进行最优估计和控制的

框架。考虑到该理论在运动员整合不同信息源过程中的潜在应用，笔者在这里首先阐述了贝叶斯决策理论的数学定义，然后例举人体感觉运动控制的概率模型来进一步说明贝叶斯决策过程。

3.1　贝叶斯决策理论的数学定义

贝叶斯决策理论定义了个人的信念如何与其目标相结合，从而做出最优决策(Körding & Wolpert, 2006)。它由贝叶斯统计和决策理论两个部分组成，可以用于解释运动决策中的两种心理过程，即预期反应和动作选择反应。贝叶斯统计涉及了对不确定的数据进行概率推理，以产生最优估计。概率推理包括将当前的信息(在某种程度上并不是决定性的)与知识(即先验分布)结合起来。例如，个人可以结合多个信息源形成极大似然估计(maximum likelihood estimate, MLE)，也可以结合对环境可能状态的先验信念形成最大后验(maximum a posteriori, MAP)估计，还可以运用卡尔曼滤波(Kalman filter)对时变状态进行估计(Wolpert, 2007)。基于这些推理，决策理论被用于确定在给定任务目标下的最佳行动。

3.1.1　贝叶斯统计

贝叶斯统计定义了新信息如何与先验信念相结合，以及如何整合来自不同模式的信息。它有两个重要变量：未观测参数(θ)和观测数据(s)。另外，先验 $P(\theta)$反映了不同的参数设置是如何先验地独立于观测数据的。似然 $P(s|\theta)$是指在给定参数的情况下观测数据的概率。这里似然和后验 $P(\theta|s)$之间存在一个简单的概率关系，称作贝叶斯定理(Bayes' rule)：

$$\underbrace{P(\theta|s)}_{\text{后验}}=\frac{\overbrace{P(s|\theta)}^{\text{似然}}\overbrace{P(\theta)}^{\text{先验}}}{\underbrace{P(s)}_{\text{证据}}}$$

证据 $P(s)$也称作边际似然(marginal likelihood)，后验推理的求解相当于计算边际似然：

$$P(s)=\int P(s|\theta)P(\theta)d\theta$$

使用 MLE 是在给定期望估计的参数情况下，最大化观测数据的概率。如果知道环境的可能参数(即先验)，那么应该使用贝叶斯定理估计后验。使用后验的最大值可以找到最可能的参数设置，后验分布的峰值被称为 MAP 估计。在缺乏先验知识的情况下(即 $P(\theta)$对于 θ 的所有值都是等同的)，MLE 和 MAP 估计是同等的过程。贝叶斯估计输出的通常是后验概率，即给定感官输入(s)的环境所有可能状态(θ)的概率。

3.1.2　决策理论

一旦贝叶斯推理给出一个准确的状态估计，决策理论原则上就可以通过定义一个损失函数(loss function)来选择适当的行动。损失函数 $L(a, \theta)$量化了在各种可能的环境状态(θ)下，采取各种可能的行动(a)值，也称作成本函数(cost function)或目标函数(objective function)。决策理论基于个人当前信念选择行动或决策，其本质是在个人的信念下最小化预期损失(或最大化预期回报/效用)。个人可以选择预期损失最小的行动。要选择最佳行动，只需要计算给定行动的期望损失 $\mathbb{E}L(a)$，即依据对状态的信任程度加权的可能状态的平均损失：

$$\mathbb{E}L(a)=\sum_{\theta}L(a,\theta)P(\theta|s)$$

综上，贝叶斯决策模型有两个组成部分(图1)。第一个是贝叶斯定理，它规范化了决策者如何在给定一组特定的观测结果的情况下，为假设的环境状态分配概率(信念程度)。第二个是损失函数，这是决策者期望最小化的数量，比如任务中的误差比例。损失函数指示决策者如何将关于环境状态的信念转变为决策。这些部件经过组合，最终得到一个从观测到决策的映射(Ma, 2019)。这里需要指出的是，基于心理学的贝叶斯决策模型应该与统计中贝叶斯学派的分析方法(比如贝叶斯因子)区分开来(胡传鹏 等, 2018)。

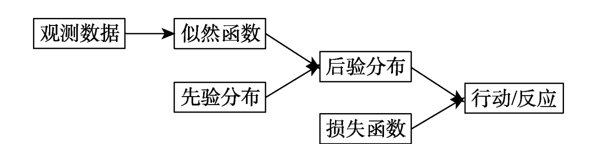


图 1　贝叶斯决策示意图
资料来源：Ma (2019)

3.2　人体感觉运动控制的贝叶斯决策模型

对运动预期研究中的一个关键问题是探讨不同信息源对运动结果预期的贡献以及两者之间的相互作用。人体感觉运动控制的贝叶斯决策模型或许会提供一个解决方案。人的感觉系统提供了关于身体和周围环境的重要信息，对运动控制的研究通常会关注人的神经系统是如何利用这些感觉信息来实现目标。因此，运动控制关键的第一

步是可靠、准确地整合感觉信息(Berniker & Körding, 2011)。为了更好地阐明贝叶斯决策过程，笔者引入一个已经被验证的简单任务来解释感觉运动系统是否可以运用贝叶斯方法来表示先验和似然，然后再结合起来(Körding & Wolpert, 2004a)。

如图 2 所示，光标会沿着一条直线短暂地出现在某个位置，被试的任务就是准确地指向该位置。由于光标的显示时间非常短暂，视觉系统存在不确定性。如果光标出现在 1 cm 的位置，那么这是最有可能看到它的位置。但由于噪音的存在，被试有可能在 0.9 cm 或 1.1 cm 的位置看到它。这里假设高斯噪音，光标在 1 cm 的位置出现的概率(似然)，因此 MLE 是让被试报告光标出现的位置。多数情况下，光标并不会均匀地位于直线上，而是有一些位置分布。例如，以 0 为中心的高斯分布，标准偏差为 1 cm (先验)。如果被试在 1 cm 的位置上看到光标，由于视觉系统存在噪音，它的真实位置可能是 0.9 cm 和+0.1 cm 的视觉误差，或 1.1 cm 和–0.1 cm 的视觉误差。这里+0.1 cm 或–0.1 cm 的视觉误差是等概率的。然而由于光标位置的先验分布是高斯分布，0.9 cm 是真实位置的概率大于 1.1 cm。这就是说，当光标出现在 1 cm 的位置，它的真实位置更可能是 0.9 cm 和+0.1 cm 的视觉误差，而不是 1.1 cm 和–0.1 cm 的视觉误差。事实上，这个最可能的位置是通过将先验曲线和似然曲线点乘(point-wise)找到的。后验曲线的峰值是将偏向先验分布平均值的 MAP 估计，其峰值位于先验峰值和似然峰值之间。因此，如果观察到所有光标的真实位置在 1 cm 处，贝叶斯策略会得出一个偏向先验的估计，即被试可能指向 0.9 cm 的位置(Wolpert, 2007)。这项研究表明，贝叶斯方法可以被人的神经系统用于解决感觉信息中的不确定性问题。

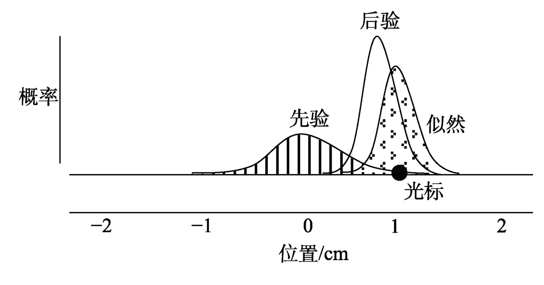


图 2 贝叶斯整合示意图
资料来源：Wolpert (2007)

如果考虑在两次移动中都偏离目标 2 cm，或第一次偏离目标 1 cm 和第二次偏离目标 3 cm 之间做出选择，损失函数指定哪个选择更好？例如，如果损失函数是平方误差，那么第一个选择更可取(损失为 $2^2 + 2^2 = 8$，小于第二个选择的损失 $1^2 + 3^2 = 10$)。但如果损失在绝对误差中是线性的，那么两者都是同等可取的(损失均为 4，分别是 2 + 2 = 4 和 1 + 3 = 4)。如果损失函数与误差的平方根成比例，那么第二个选择更可取(损失为 $\sqrt{1}+\sqrt{3}\approx 2.7$，小于第一个选择的损失 $\sqrt{2}+\sqrt{2}\approx 2.8$)。因此，损失函数的精确度可以通过要求被试在不同的误差分布中进行选择来估计。这种运动决策任务的结果显示，对于小误差，损失函数与平方误差成正比，但对于大误差，损失函数的上升幅度较小(Körding & Wolpert, 2004b)。与平方损失函数相比，这种损失对异常值具有稳健性。总之，通过对人体感觉运动控制的贝叶斯决策模型的详细阐述，将有助于我们在认识贝叶斯模型和损失函数概念的基础上，更好地理解贝叶斯决策理论是如何阐释复杂的运动决策过程的。

4 贝叶斯决策理论在网球领域的潜在应用

在网球比赛中，运动预期可能主要依赖于情境信息，比如击球顺序和选手位置(Loffing & Hagemann, 2014; Murphy et al., 2018)或结合情境信息和姿势线索，比如对手的臀部或肩部动作(Causer et al., 2017; Jackson & Mogan, 2007)。这两种信息源能够促进运动预期，会随关键事件(比如对手的球拍与球接触)的临近变化。在对手的动作模式出现之前和进程中，网球选手可以提取情境信息。在对手准备打出关键的击球时，在随后的动作中会出现相关的姿势线索(Müller & Abernethy, 2012)。这些不同的信息源可以结合起来，每个信息源的相对重要性取决于动作的阶段。

4.1 结合视觉信息与听觉线索的多感觉整合

有证据表明，成功预测网球击球所需的视觉线索，特别是对视觉信息的提取，将有助于选手对球拍移动的预测(Cañal-Bruland & Mann, 2015; Loffing & Cañal-Bruland, 2017)。听觉线索同样影响网球选手对对手击球结果的判断，剥夺听觉信息会对选手的表现产生不利影响。而球拍与球接触产生的声音越大，选手预测球的轨迹就越长

(Cañal-Bruland et al., 2018)。排球中也有类似报道，与视觉信息相比，运动员依赖听觉线索能够更准确地判断出球的速度，从而为依赖听觉系统来判断冲击力和球的最终速度时的敏感性提供了初步证据(Sors et al., 2017)。这似乎表明，如果网球选手能够有效结合视觉信息与听觉线索，那么将有助于竞赛中其决策能力的提高。

依据贝叶斯模型，视觉信息与听觉线索的结合属于多感觉整合。不同的感知模态(比如视觉和听觉)可以对网球的状态(比如球的视觉和听觉位置)进行抽样，这也导致不同的感知模态常被置于冲突之中。例如，网球的听觉和视觉位置不匹配时，感知应处于两个感知模态之间。即使是正常的感官输入，人的感官功能也是变化的，可能会有偏差。因此，来自不同模态的估计可能不一致。然而贝叶斯模型可以从视觉和听觉两种不同的模态对网球位置进行估计，通过加权平均产生一个最优估计。每个模态的权重取决于其可靠性，更可靠的模态对最终估计的贡献更大。这种多感觉整合的贝叶斯模型能否有效地解释结合视觉信息与听觉线索的估计，还需要基于模型的研究进一步证实。

4.2　结合感觉信息与先验信念的贝叶斯整合与状态估计

估计通常取决于两种不同的线索，多感觉整合结合了两种线索或多种模态的信息(比如视觉与听觉)。而对环境可能状态的先验估计可以视为用于完善估计的另一种信息源。例如，有些网球选手在接发球时倾向于站在靠近底线的位置，这种站位选择的先验分布提供了有价值的信息。先验在数学上可以被认为类似于另一种感知模态，因为它提供的信息是加权的感官输入，这取决于先验相对于感官证据的可靠性。将感觉信息与先验信念相结合得到的最优估计(或后验估计)，其不确定程度始终低于单纯基于感觉信息的估计，这意味着贝叶斯估计通过将感觉信息与先验信念相结合降低了不确定性(Körding & Wolpert, 2006)。

网球选手在比赛中通常需要估计回球的落点。Körding (2007)认为，由于视觉系统不能提供关于球速的完备信息，回球的落点是不确定的。这里把球的不同落点的特定感官输入的概率称为似然。选手在比赛过程中需要将这些信息与自身的网球经验结合起来，即球的落点并不是在球场上均匀分布的。例如，球的落点很可能集中在球场的范围内，在最难以回球的边界线附近达到分布峰值。这种落点位置的分配被称为先验，可以通过经验进行学习。贝叶斯定理定义了如何结合先验和似然对回球落点进行最优估计(图 3)。

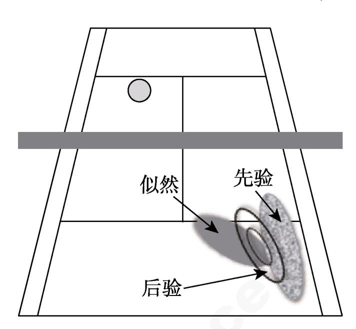


图 3　落点判断中的贝叶斯整合
资料来源：Körding (2007)

前述中对回球落点的预测仅使用了单个时间点的估计值，但是环境的状态及其相关信息是不断变化的。在比赛中，网球选手不断观察球的移动，不断更新对球落点的信念。卡尔曼滤波规范化了这样一个过程(图 4)。它使用关于动态的环境知识，将对前一个时间点的环境状态的信念转换成将来时间点的信念。例如，网球选手在比赛中所得到的信念(先验)与新的感觉信息(似然)相结合，生成更新的信念(后验)。通过这种方式，卡尔曼滤波可以随时间的推移不断更新信念。随着球的移动，选手在比赛中对球落点的估计不断更新，这种策略预测会变得更精确(Körding, 2007)。

5　受贝叶斯决策模型启发的足球领域研究

以往对球员预期反应的研究通常会采用从足球比赛中提取视频中连续镜头的方式进行，研究内容涉及球员快速和精确地提取周围的对手、队友和球的位置以及预期的动作信息(控球、射门、传球)。高水平球员能够更准确地预测对手的动作、移动方向和最终的传球目标。在动态的、有时间约束的足球比赛中，预测技能有助于球员觉察他人的意图。例如，从对手的一个姿势取向提前获取信息的能力，识别熟悉的比赛或团队的动态序列模式的能力，以一种更有效的方式搜索视觉场景的能力，以及在任何既定的时刻都能够准确预测对手最可能的选择等(Gonçalves et al., 2015)。

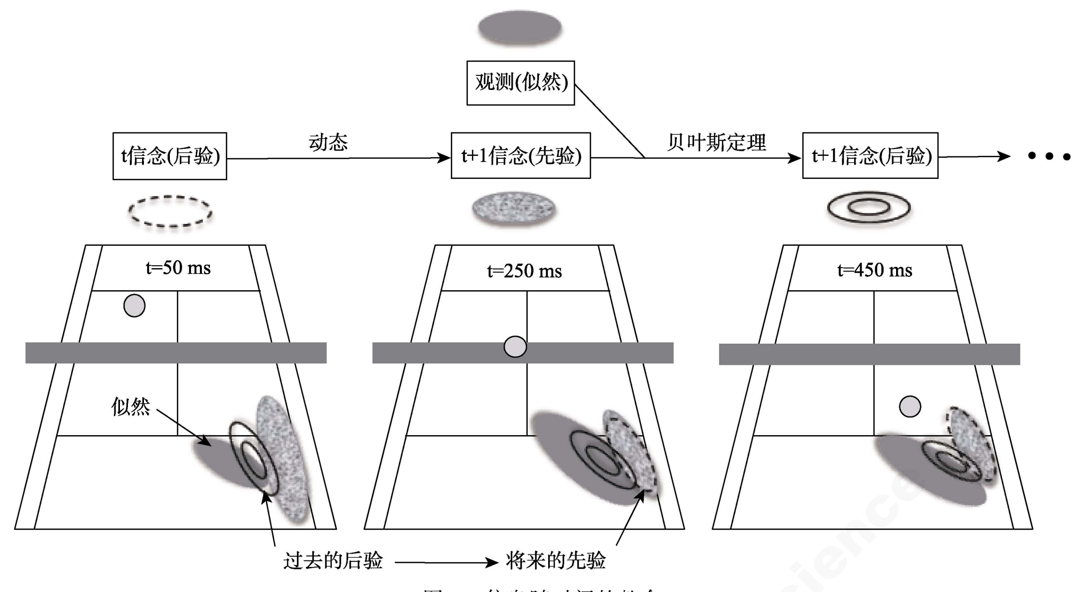


图 4　信息随时间的整合
资料来源：Körding (2007)

5.1　点球情境中不同信息源的整合

足球比赛中，罚点球也为运动预期的研究提供了一个有效范式。当罚点球时，不同罚点球队员可能采取不同的策略。例如，罚点球队员通常使用闭环(依赖型)或开环(独立型)策略。闭环策略是指罚点球队员在罚点球过程中关注守门员的行为动作，将球射向与守门员扑救方向相反的区域。开环策略是指罚点球队员在罚点球过程中忽略守门员的行为动作，将球射向预先选择的射门区域(洪晓彬 等, 2020)。使用依赖型策略的罚点球队员可能会优先考虑运动学信息(比如守门员的姿势与动作)，而使用独立型策略的罚点球队员可能会更多依赖于情境信息(比如守门员的位置和/或动作偏好; Cañal-Bruland & Mann, 2015)。

足球从罚球点至球门的飞行时间在 0.2~0.3 秒或 0.5~0.6 秒，而守门员从球门中间移动至球门不同位置所需的时间为 0.6~1 秒之间(洪晓彬 等, 2020)。因此，守门员研究对方罚点球队员的动作偏好是为了提高成功扑就的可能性，尤其是在视觉运动学信息(比如球飞行的路线)是不确定的和/或做出响应的可用时间特别少的情况下。依靠隐式生成(Mann et al., 2014)或明确指示的动作偏好信息(Navia et al., 2013)可能会促进预期表现。但是只有当比赛时球员表现出与训练中相同的动作偏好时，守门员才会提高预测罚球方向的能力；反之预测的准确性会下降。Wang 等人(2019)研究发现，先验线索显著影响了守门员对点球结果的运动预期。当预期射门与先验线索一致时，运动专家的预期表现提高。与新手相比，他们更善于整合先验线索和运动学信息，从而能够更准确地预测点球射门的方向，认为这可能是由于运动专家对多种信息源进行最优整合(optimal integration)的结果。

5.2　情境先验与判断效用的卷积效应

高水平球员在预测对手下一步行动时，会使用明确的情境先验来指导自己的判断(Gredin et al., 2018, 2019)。Gredin 等人(2018)的研究发现，在有明确先验的情况下，球员将他们的视觉注意力分配给无球跑动的进攻队友，因为对队友跑动轨迹的判断使他们能依据进攻队友在球上的动作倾向进行判断。在接近关键动作时，球员会更多依赖于进攻队友在球上不断变化的运动学信息来指导他们的判断。因此，明确的情境先验会促使球员更多考虑与进攻队友无球跑动的位置及对手的动作倾向，更少考虑对手的运动学信息。明确的情境先验产生的这种偏倚效应会提高运动表现，比在没有明确先验的情况下表现出更高的预测效率。

依据贝叶斯理论，最终判断既受到可用信息的可靠性的影响，也受判断相关的潜在成本和回报的准确性的影响。个人试图最大化判断准确的

可能性，同时最大化判断的预期效用。换而言之，先验和当前信息所传达的可靠性的加权平均值与潜在的判断效用值发生卷积(Geisler & Diehl, 2003)。判断是指个人如何预测可能的选择的结果。判断效用是指与个人的预测结果相关的潜在成本和回报：高判断效用与高回报和低成本相关，低判断效用与低回报相关。它对预期的偏倚效应不仅反映了个人对获得奖励和避免损失的期望，也反映了个人倾向于使用当前信息确认高效用选择的可行性(DeKay et al., 2009; Russo & Yong, 2011)。Gredin 等人(2019)研究了判断效用对足球运动员预期心理过程中外显情境先验和视觉信息整合的影响。结果表明，明确的情境先验改变了球员信息加工的优先级，使他们的预期与对手的动作倾向相符合，提高了预期表现。这些效应在情境先验与判断效用不一致的情况下可能被抑制，使球员对情境先验和视觉信息的依赖程度降低，更倾向于选择最高奖励和最低成本的结果。因此，判断效用会影响运动学信息和非运动学信息的整合，降低预期心理过程中情境先验的影响程度。

6　基于启发式近似的运动决策

依据贝叶斯理论，当整合多个信息源时，个人通过对信息源的不确定性来权衡信息源的影响，从而产生一个理想的决策。这就如同由多个信息变量的加权积分得到的联合概率分布(joint probability distribution)。如果一个信息变量比另一个具有更多的不确定性，那么联合概率分布应该偏向于不确定性较小的变量(Knill & Pouget, 2004; 胡传鹏 等, 2018)。因此，运动员可能以贝叶斯整合的方式将运动学信息和非运动学信息结合起来，当运动学信息的不确定性较大时，他们更依赖于非运动学信息，反之亦然(Helm et al., 2020; Loffing & Hagemann, 2014)。考虑到运动决策的特点是可用信息少、时间压力大以及结果的不确定性，这就迫使运动员必须快速做出选择。在不确定的情况下，竞技体育中并非所有的选择、结果或概率都是已知的，有研究者认为概率论和经典的决策理论不能够有效解决此类问题(Raab & Gigerenzer, 2015)。他们提出另一种可行的解决方案——启发式，一种忽略部分可用信息或全部计算的决策策略(Gigerenzer & Gaissmaier, 2011)。因而认为运动员在某些情况下倾向于使用简单启发式，以便尽可能快速、准确地做出反应(de Oliveira et al., 2014; Raab, 2012)。

另一方面，Sanborn 和 Chater (2016)认为人脑是不需要表示或计算概率的。相反，它是一个贝叶斯采样器(Bayesian sampler)。只有在无限样本的情况下，贝叶斯采样器才符合概率规律，而在有限样本的情况下，它会系统产生经典的概率推理错误。而且，Gardner (2019)新近提出的启发式近似，为需要完备先验知识和复杂计算的知觉推理过程提供了一种快速的启发式解决方案(图 5)。与贝叶斯推理(图 5a)不同的是，启发式不需要从大量样本中重新创建一个完备的后验分布，通常只要少量样本就足以使一次抽样接近解决方案(图 5b)。另外，在运动方向知觉-估计任务中，主观估计的概要统计(均值和标准差)符合贝叶斯模型的预测，测试的实际分布表明在不同实验的先验与证据之间的切换启发式(switching heuristic)与其相对可靠性成比例，而不是将先验与证据相乘(图 5c)。研究发现儿童在学会完全整合之前，会在知觉线索组合任务中使用类似的切换启发式(Adams, 2016; Nardini et al., 2008)。这或许提示我们，在运动员需要快速做出选择时，他们同样会优先考虑利用不确定性较小的信息源进行预测。例如，在网球比赛中，击球方向的概率随击球者的场上位置而变化。网球选手在预测正手底线击球方向时，尤其依赖于对手的位置信息。当对手击球的运动学信息减少时，选手预测行为的位置依赖更为明显，更早出现预测行为(Loffing & Hagemann, 2014; Triolet et al., 2013)。由于对手高质量的击球导致无法直接观察到球的完备状态时，选手可能会更多(甚至完全)依赖于情境先验。此外，其他的启发式解决方案还建议使用最近一次抽样的统计数据作为先验的估计来替代完备的先验分布(图 5d)。这或许提示我们，在足球点球中，罚点球队员可以仅凭守门员前一次的扑球方向来选择自己的射门方向。总之，启发式近似的提出为运动员在贝叶斯框架下如何快速做出选择提供了理论依据。

综上，贝叶斯决策理论为运动员如何更好地将非运动学(情境)信息和(视觉)运动学信息结合提供了一个基本框架。一方面，贝叶斯统计和决策理论分别对运动决策过程中的预期反应和动作选择反应做出解释。当整合多个信息源时，通过

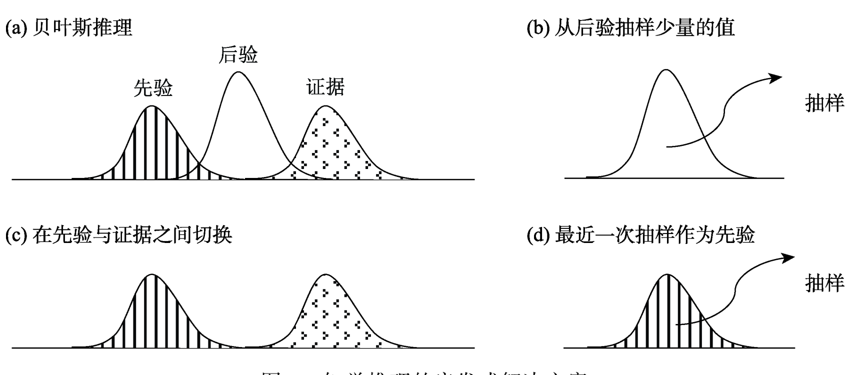


图 5 知觉推理的启发式解决方案
资料来源：Gardner (2019)

对信息源的不确定性来权衡信息源的影响，从而产生一个理想的决策。另一方面，在复杂和有时间压力的竞赛情景中，运动员可能采用启发式近似快速做出选择。首先，启发式近似假设运动员依据竞赛中不同信息源的不确定程度，很可能选择在运动学信息和情境先验之间进行切换启发式(图 6①)，从而提高运动预期的效率。例如，情境先验和运动学信息有可能在不同的时间尺度上发挥作用。情境先验通常是在运动学信息出现之前就已经收集完毕。它在动作执行之前可用，而运动学信息只有在对手的动作展开时才可用。其次，判断效用通过卷积效应影响两种信息源的整合(图 6②)，降低情境先验的影响程度。

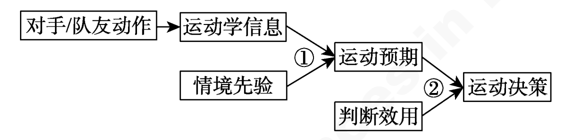


图 6 贝叶斯框架下的运动决策示意图

7 局限与展望

前述中笔者例举的网球和足球领域的研究受到贝叶斯决策模型的启发。目前仅有一项研究直接比较了使用包括贝叶斯整合模型(Bayesian integration model)在内的结果分析(Helm et al., 2020)。其中，无整合模型(no integration model)表示的是当被试没有整合运动学信息和动作偏好信息作为他们的预期判断时可能的结果预测，相等权重模型(equal weighting model)表示的是被试通过赋予信息源相等权重整合运动学信息和动作偏好信息，贝叶斯整合模型表示的是某种程度上符合贝叶斯理论而赋予更确定的信息源更多的权重。依据贝叶斯整合模型，只有当运动学信息变得模糊时，心理测量函数的权重才会导致典型的曲线行为，认为基于贝叶斯整合模型的结果预测好于其他两个模型。然而尚未有研究直接比较贝叶斯决策模型与其他模型在运动决策中的潜在竞争关系。考虑到有学者认为主动推理(active inference)对运动控制的阐释可能更准确(Friston, 2011)，建议在运动决策研究中比较不同的模型与数据拟合，这将有助于我们对模型进行选择。

贝叶斯决策理论是一个描述如何运用贝叶斯概率原理优化决策的理论。从模型角度看，如果新手和运动专家均采用贝叶斯决策理论进行决策，他们得到的结果应该都是最优的。但在现实中，两者得到的结果并不相同。与新手相比，运动专家更善于整合先验线索和运动学信息，从而能够更准确地预测点球射门的方向(Wang et al., 2019)。所以模型本身的最优与现实中的最优是不同的。那么导致两者之间的差异是由于先验的不同？或是似然函数的不同？亦或是都有可能不同？具体计算机制尚未明确，有待进一步研究证实。

在竞技体育领域中，运动专家在不同情况下都能够较好地把握时机、卓有成效地发挥自己所掌握的技、战术水平，取得预期效果。从贝叶斯决策理论的角度看，运动专家通过长期的训练和比赛习得丰富的先验知识。例如，运动员通过总结过去一些特殊情境中的运动经验而形成的结构，即运动图式(game related schema)，它有助于运动员在以后同样的情境再次出现时做出准确判断。专项训练的结果就是使运动图式得以不断演进，从而使专家在进行特定的运动知觉任务时取得比

新手更好的成绩。这也被视为运动专项知识经验的积累过程，是后天培养的结果(周成林, 刘微娜, 2010)。有趣的是，尽管贝叶斯决策模型应该与数据分析中的贝叶斯统计区分开来，笔者假设运动专家、新手及非运动员所具备的相关运动经验的先验知识与贝叶斯方法中的有信息先验(informative prior)、部分信息先验(weak informative prior)及无信息先验(noninformative prior or diffuse prior)可能存在某种对应关系(王孟成 等, 2017)。值得注意的是，Jackson 等人(2020)的研究表明，情境概率信息对运动专家和新手的影响都很明显，这凸显了先验预期的强大效应，特别是当先验预期与假动作所传达的意图一致时。因此，今后需要通过更多的实证研究来完善贝叶斯框架下的运动决策，并关注运动专家先验知识的形成，这或许有助于竞赛中运动员决策能力的提高。

参考文献

程勇民. (2006). 运动水平、知识表征及其年龄对羽毛球竞赛情景中直觉性运动决策的影响. *体育科学, 26*(1), 86–95.

洪晓彬, 施艳, 徐爱爱, 赵孟炎, 熊明生. (2020). 国外足球点球心理研究进展. *武汉体育学院学报, 54*(5), 94–100.

胡传鹏, 孔祥祯, Wagenmakers, E.-J., Ly, A., 彭凯平. (2018). 贝叶斯因子及其在 JASP 中的实现. *心理科学进展, 26*(6), 951–965.

王斌. (2004). 男子手球运动员模拟运动情境中认知决策与直觉决策的差异. *体育科学, 24*(6), 45–48.

王孟成, 邓俏文, 毕向阳. (2017). 潜变量建模的贝叶斯方法. *心理科学进展, 25*(10), 1682–1695.

周成林, 刘微娜. (2010). 竞技比赛过程中认知优势现象的诠释与思考. *体育科学, 30*(10), 13–22.

Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception, 30*(2), 233–252.

Abernethy, B., Zawi, K., & Jackson, R. C. (2008). Expertise and attunement to kinematic constraints. *Perception, 37*(6), 931–948.

Adams, W. J. (2016). The development of audio-visual integration for temporal judgements. *PLoS Computational Biology, 12*(4), e1004865.

Belling, P. K., Suss, J., & Ward, P. (2015). Advancing theory and application of cognitive research in sport: Using representative tasks to explain and predict skilled anticipation, decision-making, and option-generation behavior. *Psychology of Sport & Exercise, 16*, 45–59.

Berniker, M., & Kording, K. (2011). Bayesian approaches to sensory integration for motor control. *WIREs Cognitive Science, 2*(4), 419–428.

Cañal-Bruland, R., Filius, M. A., & Oudejans, R. R. D. (2015). Sitting on a fastball. *Journal of Motor Behavior, 47*(4), 267–270.

Cañal-Bruland, R., & Mann, D. L. (2015). Time to broaden the scope of research on anticipatory behavior: A case for the role of probabilistic information. *Frontiers in Psychology, 6*, 1518.

Cañal-Bruland, R., Muller, F., Lach, B., & Spence, C. (2018). Auditory contributions to visual anticipation in tennis. *Psychology of Sport & Exercise, 36*, 100–103.

Causer, J., Smeeton, N. J., & Williams, A. M. (2017). Expertise differences in anticipatory judgements during a temporally and spatially occluded task. *PloS One, 12*(2), e0171330.

Cocks, A. J., Jackson, R. C., Bishop, D. T., & Williams, A. M. (2016). Anxiety, anticipation and contextual information: A test of attentional control theory. *Cognition and Emotion, 30*(6), 1037–1048.

DeKay, M. L., Patiño-Echeverri, D., & Fischbeck, P. S. (2009). Distortion of probability and outcome information in risky decisions. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 109*(1), 79–92.

de Oliveira, R. F., Lobinger, B. H., & Raab, M. (2014). An adaptive toolbox approach to the route to expertise in sport. *Frontiers in Psychology, 5*, 709.

Farrow, D., & Reid, M. (2012). The contribution of situational probability information to anticipatory skill. *Journal of Science & Medicine in Sport, 15*(4), 368–373.

Friston, K. (2011). What is optimal about motor control? *Neuron, 72*(3), 488–498.

Gardner, J. L. (2019). Optimality and heuristics in perceptual neuroscience. *Nature Neuroscience, 22*(4), 514–523.

Geisler, W. S., & Diehl, R. L. (2003). A Bayesian approach to the evolution of perceptual and cognitive systems. *Cognitive Science, 27*(3), 379–402.

Gigerenzer, G., & Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual Review of Psychology, 62*, 451–482.

Gonçalves, E., Gonzaga, A. D. S., Cardoso, F. D. S. L., & Teoldo, I. (2015). Anticipation in soccer: A systematic review. *Human Movement, 16*(2), 95–101.

Gray, R. (2002). Behavior of college baseball players in a virtual batting task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 28*(5), 1131–1148.

Gray, R., & Cañal-Bruland, R. (2018). Integrating visual trajectory and probabilistic information in baseball batting. *Psychology of Sport & Exercise, 36*, 123–131.

Gredin, N. V., Bishop, D. T., Broadbent, D. P., Tucker, A., & Williams, A. M. (2018). Experts integrate explicit contextual priors and environmental information to improve anticipation efficiency. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 24*(4), 509–520.

Gredin, N. V., Broadbent, D. P., Williams, A. M., & Bishop, D. T. (2019). Judgement utility modulates the use of explicit contextual priors and visual information during anticipation. *Psychology of Sport & Exercise, 45*, 101578.

Helm, F., Cañal-Bruland, R., Mann, D. L., Troje, N. F., & Munzert, J. (2020). Integrating situational probability and kinematic information when anticipating disguised movements. *Psychology of Sport & Exercise, 46*, 101607.

Huys, R., Cañal-Bruland, R., Hagemann, N., Beek, P. J., Smeeton, N. J., & Williams, A. M. (2009). Global information pickup underpins anticipation of tennis shot direction. *Journal of Motor Behavior, 41*(2), 158–171.

Jackson, R. C., Barton, H., & Bishop, D. T. (2020). Knowledge is power? Outcome probability information impairs detection of deceptive intent. *Psychology of Sport & Exercise, 50*, 101744.

Jackson, R. C., & Mogan, P. (2007). Advance visual information, awareness, and anticipation skill. *Journal of Motor Behavior, 39*(5), 341–351.

Jones, C. M., & Miles, T. (1978). Use of advance cues in predicting the flight of a lawn tennis ball. *Journal of Human Movement Studies, 4*(4), 231–235.

Knill, D. C., & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: The role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neurosciences, 27*(12), 712–719.

Körding, K. (2007). Decision theory: What "should" the nervous system do? *Science, 318*(5850), 606–610.

Körding, K. P., & Wolpert, D. M. (2004a). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature, 427*, 244–247.

Körding, K. P., & Wolpert, D. M. (2004b). The loss function of sensorimotor learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 101*(26), 9839–9842.

Körding, K. P., & Wolpert, D. M. (2006). Bayesian decision theory in sensorimotor control. *Trends in Cognitive Sciences, 10*(7), 319–326.

Loffing, F., & Cañal-Bruland, R. (2017). Anticipation in sport. *Current Opinion in Psychology, 16*, 6–11.

Loffing, F., & Hagemann, N. (2014). On-court position influences skilled tennis players' anticipation of shot outcome. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 36*(1), 14–26.

Loffing, F., Sölter, F., Hagemann, N., & Strauss, B. (2016). On-court position and handedness in visual anticipation of stroke direction in tennis. *Psychology of Sport & Exercise, 27*, 195–204.

Loffing, F., Stern, R., & Hagemann, N. (2015). Pattern-induced expectation bias in visual anticipation of action outcomes. *Acta Psychologica, 161*, 45–53.

Ma, W. J. (2019). Bayesian decision models: A primer. *Neuron, 104*(1), 164–175.

Mann, D. L., & Savelsbergh, G. J. P. (2015). Issues in the measurement of anticipation. In J. Baker & D. Farrow (Eds.). *Routledge Handbook of Sport Expertise* (pp. 166–175). Oxon: Routledge.

Mann, D. L., Schaefers, T., & Cañal-Bruland, R. (2014). Action preferences and the anticipation of action outcomes. *Acta Psychologica, 152*, 1–9.

Mann, D. T. Y., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: A meta-analysis. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 29*(4), 457–478.

McRobert, A. P., Ward, P., Eccles, D. W., & Williams, A. M. (2011). The effect of manipulating context-specific information on perceptual-cognitive processes during a simulated anticipation task. *British Journal of Psychology, 102*(3), 519–534.

Memmert, D., Lemmink, K. A. P. M., & Sampaio, J. (2017). Current approaches to tactical performance analyses in soccer using position data. *Sports Medicine, 47*(1), 1–10.

Milazzo, N., Farrow, D., Ruffault, A., & Fournier, J. F. (2016). Do karate fighters use situational probability information to improve decision-making performance during on-mat tasks? *Journal of Sports Sciences, 34*(16), 1547–1556.

Müller, S., & Abernethy, B. (2012). Expert anticipatory skill in striking sports: A review and a model. *Research Quarterly for Exercise & Sport, 83*(2), 175–187.

Murphy, C. P., Jackson, R. C., Cooke, K., Roca, A., Benguigui, N., & Williams, A. M. (2016). Contextual information and perceptual-cognitive expertise in a dynamic, temporally-constrained task. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 22*(4), 455–470.

Murphy, C. P., Jackson, R. C., & Williams, A. M. (2018). The role of contextual information during skilled anticipation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 71*(10), 2070–2087.

Nardini, M., Jones, P., Bedford, R., & Braddick, O. (2008). Development of cue integration in human navigation. *Current Biology, 18*(9), 689–693.

Navia, J. A., van der Kamp, J., & Ruiz, L. M. (2013). On the use of situational and body information in goalkeeper actions during a soccer penalty kick. *International Journal of Sport Psychology, 44*, 234–251.

North, J. S., Hope, E., & Williams, A. M. (2017). Identifying

the micro-relations underpinning familiarity detection in dynamic displays containing multiple objects. *Frontiers in Psychology, 8*, 963.

Raab, M. (2012). Simple heuristics in sports. *International Review of Sport & Exercise Psychology, 5*(2), 104–120.

Raab, M., & Gigerenzer, G. (2015). The power of simplicity: A fast-and-frugal heuristics approach to performance science. *Frontiers in Psychology, 6*, 1672.

Roca, A., Ford, P. R., McRobert, A. P., & Williams, A. M. (2013). Perceptual-cognitive skills and their interaction as a function of task constraints in soccer. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 35*, 144–155.

Runswick, O. R., Roca, A., Williams, A. M., Bezodis, N. E., McRobert, A. P., & North, J. S. (2018). The impact of contextual information and a secondary task on anticipation performance: An interpretation using cognitive load theory. *Applied Cognitive Psychology, 32*(2), 141–149.

Runswick, O. R., Roca, A., Williams, A. M., Bezodis, N. E., & North, J. S. (2018). The effects of anxiety and situation-specific context on perceptual-motor skill: A multi-level investigation. *Psychological Research, 82*(4), 708–719.

Runswick, O. R., Roca, A., Williams, A. M., McRobert, A. P., & North, J. S. (2018). The temporal integration of information during anticipation. *Psychology of Sport & Exercise, 37*, 100–108.

Runswick, O. R., Roca, A., Williams, A. M., McRobert, A. P., & North, J. S. (2019). Why do bad balls get wickets? The role of congruent and incongruent information in anticipation. *Journal of Sports Sciences, 37*(5), 537–543.

Russo, J. E., & Yong, K. (2011). The distortion of information to support an emerging evaluation of risk. *Journal of Econometrics, 162*(1), 132–139.

Sanborn, A. N., & Chater, N. (2016). Bayesian brains without probabilities. *Trends in Cognitive Sciences, 20*(12), 883–893.

Seriès, P., & Seitz, A. R. (2013). Learning what to expect (in visual perception). *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 668.

Sors, F., Murgia, M., Santoro, I., Prpic, V., Galmonte, A., & Agostini, T. (2017). The contribution of early auditory and visual information to the discrimination of shot power in ball sports. *Psychology of Sport & Exercise, 31*, 44–51.

Triolet, C., Benguigui, N., Le Runigo, C., & Williams, A. M. (2013). Quantifying the nature of anticipation in professional tennis. *Journal of Sports Sciences, 31*(8), 820–830.

Wang, Y. Y., Ji, Q. C., & Zhou, C. L. (2019). Effect of prior cues on action anticipation in soccer goalkeepers. *Psychology of Sport & Exercise, 43*, 137–143.

Ward, P., Ericsson, K. A., & Williams, A. M. (2013). Complex perceptual-cognitive expertise in a simulated task environment. *Journal of Cognitive Engineering & Decision Making, 7*(3), 231–254.

Williams, A. M. (2009). Perceiving the intentions of others: How do skilled performers make anticipation judgments? *Progress in Brain Research, 174*, 73–83.

Williams, A. M., & Jackson, R. C. (2019). *Anticipation and decision making in sport*. London and New York: Routledge.

Wolpert, D. M. (2007). Probabilistic models in human sensorimotor control. *Human Movement Science, 26*(4), 511–524.

Inspiration of Bayesian decision theory for action anticipation in complex decision making in sports: Taking tennis and soccer as examples

WANG Ze-Jun[1], CHU Xin-Yu[2]

([1] *International College of Football, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*)

([2] *Sports Economic Management Research Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai* 201620, *China*)

Abstract: The study of decision making in sports has always been a significant field of cognitive psychology in sports. Action anticipation is the core of decision making in sports, which is thought to be influenced by kinematic and non-kinematic information factors. One of the key issues in the study of action anticipation is to explore the contribution of diverse information sources to the expectation of action outcome and the interaction between them. The researchers explain the integration process of different information in action anticipation in sports and analyze how athletes make the optimal choice in complex competition situations in sports by using Bayesian decision theory, especially its potential applications in

tennis and soccer. Although not all choices, outcomes, or probabilities in competitive sports are known in the context of uncertainty, some researchers believe that probability theory and canonical decision theory cannot effectively solve such problems, the newly proposed heuristic approximation provides a theoretical basis for athletes to make a rapid choice in the Bayesian framework. First of all, in complex and time pressure competitive situations, heuristic approximation assumes that athletes are likely to choose a switching heuristic between kinematic information and contextual priors according to the uncertainty of different information sources in the competition, so as to improve the efficiency of action anticipation. Secondly, judgement utility affects the integration of two information sources through the effect of convolution, so as to reduce the impact degree of contextual priors.

Key words: action anticipation, contextual priors, judgement utility, heuristic approximation